

А.П. КОНОНЕНКО, д-р. техн. наук, ДНТУ, г. Донецк

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОГО ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

Встановлені закономірності зміни гідродинамічних параметрів кільцевого водоповітряного потоку у вертикальній підіймальній трубі газорідинного підйомника..

The regularities of change of hydrodynamic parameters of the annular air-water flow in the vertical lifting pipe of the gas-liquid lift are stated.

1. Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Изменение давления газожидкостного потока по высоте подъемной трубы эрлифта приводит к соответствующему изменению гидродинамических параметров водовоздушной смеси, а, зачастую, и ее структуры.

Повышение энергетической эффективности газожидкостных подъемников предполагает возможность количественной оценки распределения подведенной к аппарату мощности, в том числе, и по высоте подъемной трубы. Такой анализ необходимо выполнять для характерных режимов работы эрлифта, одним из которых является режим максимальной подачи.

Наряду со снарядной и эмульсионной, в эрлифте возможна реализация кольцевой структуры водовоздушной смеси, особенно при работе на малых относительных погружениях смесителя ($\alpha < 0,2$), что имеет место, в частности, при чистках зумпфов скиповых стволов угольных шахт и др.

Поэтому количественный анализ распределения гидродинамических параметров кольцевого водовоздушного потока по высоте подъемной трубы эрлифта в режиме его максимальной подачи является актуальной научной и практической задачей.

2. Анализ исследований и публикаций.

Анализ изменения гидродинамических параметров, преимущественно давлений и мощностей, в [1, 2, 3] выполнен в зависимости от расхода сжатого воздуха газожидкостным подъемником. Закономерности распределения газосодержаний, плотностей, скоростей газожидкостной смеси и ее компонентов, а также давлений и мощностей водовоздушных потоков по высоте подъемной трубы эрлифта в указанных работах не рассматривались.

Аналогичная задача решена в [4] применительно к снарядной структуре газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта. Однако, учитывая принципиальные отличия как в физических основах снарядной и кольцевой структур водовоздушных потоков [5], так и принципах математического

моделирования рабочих процессов эрлифтов с данными структурами [6, 7], следует ожидать отличий в закономерностях изменения гидродинамических параметров газожидкостных потоков с кольцевой структурой от известных установленных закономерностей применительно к снарядному потоку двухфазной смеси в эрлифте.

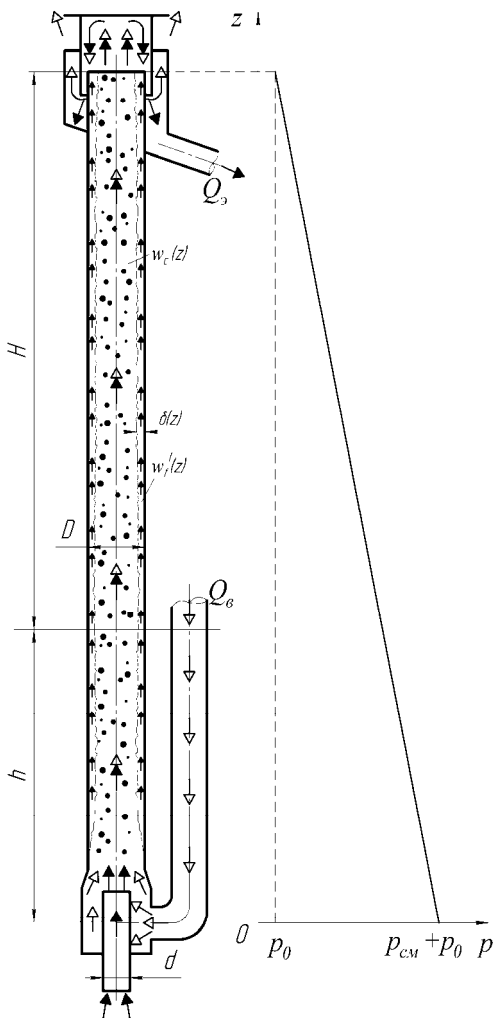


Рис. 1 – Схема эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока и эпюра давления в подъемной трубе

3. Постановка задачи.

Для режима максимальной подачи, как одного из характерных режимов работы эрлифта, установить закономерности изменения гидродинамических параметров кольцевого водовоздушного потока по высоте вертикальной подъемной трубы газожидкостного подъемника.

4. Изложение материала и результаты. При разработке математической модели рабочего процесса эрлифта [7] под кольцевой структурой вертикального водовоздушного потока понимали таковую, при которой пленка жидкости толщиной $\delta(z)$ движется по внутренней стенке подъемной трубы эрлифта диаметром D , длиной $H+h$ (H – высота подъема, h – геометрическое погружение смесителя) со скоростью $w_f'(z)$. Газ с каплевыми и близкими к ним включениями жидкости образуют гомогенное ядро потока, перемещающееся со скоростью $w_c(z)$ (см. рис. 1). Между газожидкостным ядром потока и пленкой жидкости имеет место массообмен за счет уноса и осаждения капель.

Подвод транспортируемой жидкости в подъемную трубу обеспечивается подающей трубой диаметром d и длиной l .

Обоснование правомерности исходных базовых положений и допущений, принятых при разработке математической модели рабочего процесса эрлифта, изложено в [7].

Уравнение движения кольцевого восходящего водовоздушного потока в вертикальной подъемной трубе эрлифта возможно преобразовать к выражению [7]

$$\begin{aligned} p_{см} \frac{z_i}{H+h} = \frac{2\pi \cdot R}{\omega} \int_0^{z_i} \tau_w(z) \cdot dz + \\ + \frac{1}{\omega} \left\{ \rho_c(z) \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z) + \rho' \cdot [w_f'(z)]^2 \cdot \omega_f(z) \right\} \Big|_0^{z_i}, \\ + \frac{g}{\omega} \left[\int_0^{z_i} \rho_c(z) \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz \right], \end{aligned}$$

которое, в свою очередь, для участка подъемной трубы длиной z_i ($0 \leq z_i \leq H+h$) зачастую представляют в виде баланса давлений

$$p_{\Sigma i} = p_{mpi} + p_{yski} + p_{gi},$$

где $p_{см}$ – избыточное давление в смесителе; z_i – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы; R – радиус подъемной трубы; ω , $\omega_c(z)$, $\omega_f(z)$ – площадь соответственно поперечного сечения подъемной трубы, гомогенного ядра газожидкостного потока и пристенной жидкостной пленки; $\tau_w(z)$ – касательное напряжение на стенке трубы; ρ' , $\rho_c(z)$ – плотность соответственно воды и гомогенного ядра газожидкостного потока; g – ускорение свободного падения; $p_{\Sigma i}$ – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i ; p_{mpi} , p_{yski} , p_{gi} – перепады давления на участке подъемной трубы длиной z_i , обусловленные соответственно трением, ускорением и силой тяжести, которые определяются по выражениям

$$\begin{aligned} p_{mpi} = \frac{2\pi \cdot R}{\omega} \int_0^{z_i} \tau_w(z) \cdot dz, \\ p_{yski} = \frac{1}{\omega} \left\{ \rho_c(z) \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z) + \rho' \cdot [w_f'(z)]^2 \cdot \omega_f(z) \right\} \Big|_0^{z_i}, \\ p_{gi} = \frac{g}{\omega} \left[\int_0^{z_i} \rho_c(z) \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz \right]. \end{aligned}$$

Средний объемный расход водовоздушной смеси на участке трубы длиной z_i [7]

$$Q_{cpi} = \frac{W_6 + W_9}{z_i} \int_0^{z_i} \frac{dz}{\varphi^*(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi^*(z)] \cdot \rho'},$$

где W_6, W_9 - массовый расход соответственно воздуха и воды (массовая подача эрлифта); $\varphi^*(z)$ - расчетное газосодержание водовоздушного потока в подъемной трубе; $\rho''(z)$ - плотность воздуха.

Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, а также ее составляющие - мощности, необходимые для компенсации потерь на трение N_{mpi} , ускорение N_{yski} и гравитационную составляющую N_{gi} при движении водовоздушного потока по участку вертикальной подъемной трубы длиной z_i , определяются как произведение среднего объемного расхода Q_{cpi} на соответствующий перепад давлений $p_{\Sigma i}, p_{mpi}, p_{yski}$ и p_{gi} . Суммарная подведенная мощность N_{nodi} и мощности, подведенные потоком воды N' и сжатого воздуха N''_i , определяются по общеизвестным соотношениям [8, 9]. Мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение N_{cki} для кольцевой структуры потока определяется разностью $N_{nodi} - N_{\Sigma i}$.

Адекватность разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных расходных характеристик газожидкостных подъемников [10].

Решение полученных уравнений численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы [10] позволяет определять, в том числе, значения текущих гидродинамических параметров водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы (по высоте подъемной трубы) и при заданном расходе воздуха Q_6 .

Уменьшение давления по ходу движения водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта приводит к увеличению объемного расхода воздуха и соответствующих изменений объемного расходного газосодержания и приведенной скорости смеси.

Анализ изменения гидродинамических параметров по высоте кольцевого водовоздушного потока выполнен для режима максимальной подачи эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 150$ мм, длиной $H+h = 11,7$ м, подающей трубой диаметром $d = 30$ мм, длиной $l = 460$ мм при геометрическом погружении смесителя $h = 2,4$ м (относительное геометрическое погружение смесителя $\alpha = 0,205$) [11]. В рассматриваемых условиях структура водовоздушной смеси является кольцевой по всей высоте подъемной трубы, что подтверждается картой кризисных состояний водовоздушного потока [5].

При построении безразмерной расчетной расходной характеристики газожидкостного подъемника с вышеуказанными параметрами в качестве базисных были приняты значения расходов воздуха и подачи эрлифта в режиме максимальной подачи $Q_{в.макс} = 0,32 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{э.макс} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ (см. рис. 2) [10].

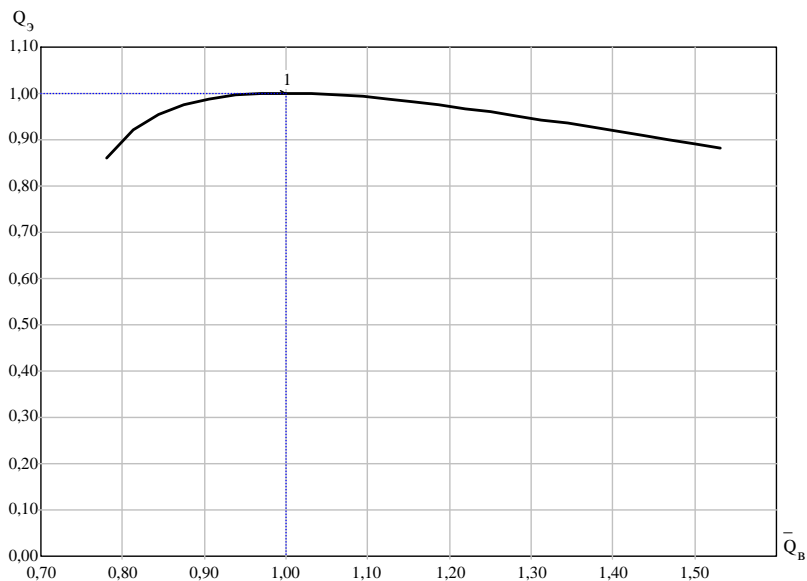


Рис. 2. Безразмерная расчетная расходная характеристика эрлифта $D = 150 \text{ мм}$, $H+h = 11,7 \text{ м}$, $d = 30 \text{ мм}$, $l = 460 \text{ мм}$, $h = 2,4 \text{ м}$, $\alpha = 0,205$ (базисные значения $Q_{в} = 0,32 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{э} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$)

Наиболее значимыми гидродинамическими параметрами двухфазного кольцевого потока являются массовая доля жидкости ε , уносимая газом, толщина пристенной пленки жидкости δ , объемное расходное β и истинное φ газосодержания, плотность ядра газожидкостного потока ρ_c , скорость гомогенного ядра w_c и воды в пристенной пленке w'_f , значения давлений, обусловленных силой тяжести p_g , трением p_{mp} и ускорением водовоздушного потока $p_{уск}$, суммарный перепад давления p_{Σ} и мощности, подведенные потоками воды N' , воздуха N'' и общая подведенная $N_{под}$, а также необходимые для преодоления сил тяжести N_g , сил трения N_{mp} и компенсации потерь на ускорение $N_{уск}$ и скольжение $N_{ск}$.

Так как гидродинамические расчеты кольцевой структуры водовоздушной смеси выполнены при допущении отсутствия массообмена

между ядром потока и пристенной пленкой [10], то значения массовой доли жидкости, уносимой газом, и толщины пленки воды постоянны по всей высоте подъемной трубы и составляют соответственно $\varepsilon = 0,483$ и $\delta = 4,7$ мм.

Изменения значений остальных перечисленных параметров водовоздушной смеси по высоте z_i подъемной трубы эрлифта в режиме максимальной подачи при расходе воздуха $Q_a = 0,32 \text{ м}^3/\text{с}$ и подаче $Q_3 = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ приведены в табл.

Как и следовало ожидать для кольцевой структуры, значения объемного расходного и истинного газосодержаний в подъемной трубе эрлифта достаточно высокие и находятся в пределах соответственно $\beta = 0,993 \div 0,994$ и $\varphi = 0,948 \div 0,956$.

Такое же высокое объемное расходное газосодержание ядра водовоздушного потока, составляющее как на входе, так и на выходе из подъемной трубы величину $\beta_c = 0,997$, и линейный закон изменений давления по ее высоте формируют значения плотности водовоздушной смеси (ядра) в диапазоне от $\rho_c = 4,85 \text{ кг/м}^3$ при $z = 0$ до $\rho_c = 4,21 \text{ кг/м}^3$ при $z = H+h = 11,7 \text{ м}$.

Скорость гомогенного ядра из-за расширения воздуха увеличивается от $w_c = 18,0 \text{ м/с}$ на уровне смесителя до $w_c = 20,7 \text{ м/с}$ на верхнем торце подъемной трубы. Скорость воды в пристенной пленке, при допущении отсутствия капельного массообмена, составляет $w'_f = 0,482 \text{ м/с}$ по всей высоте трубы.

Как суммарный перепад давления, так и его составляющие увеличиваются с увеличением длины рассматриваемого участка подъемной трубы z_i от нулевого значения на входе до значений на выходе: $p_\Sigma = 14,9 \text{ кПа}$ – суммарный перепад, $p_g = 14,4 \text{ кПа}$ – обусловленный силой тяжести, $p_{mp} = 0,312 \text{ кПа}$ – обусловленный силой трения и $p_{уск} = 0,208 \text{ кПа}$ – обусловленный ускорением.

Мощность, подведенная потоком воды, составляет $N' = 0,03 \text{ кВт}$, а мощность потока сжатого воздуха увеличивается от $N'' = 0$ при $z = 0$ до $N'' = 4,44 \text{ кВт}$ при $z = H+h = 11,7 \text{ м}$. Суммарная подведенная мощность складывается из двух последних слагаемых $N_{под} = N' + N''$.

Мощность, необходимая для преодоления сил тяжести, увеличивается по высоте подъемной трубы от $N_g = 0$ при $z = 0$ до $N_g = 0,274 \text{ кВт}$ при $z = H+h = 11,7 \text{ м}$, компенсирующая потери на трение – от $N_{mp} = 0$ при $z = 0$ до $N_{mp} = 0,006 \text{ кВт}$ при $z = H+h = 11,7 \text{ м}$ и компенсирующая потери на ускорение – от $N_{уск} = 0$ при $z = 0$ до $N_{уск} = 0,004 \text{ кВт}$ при $z = H+h = 11,7 \text{ м}$.

Таблица

Значения параметров восходящего водовоздушного потока по высоте подъемной трубы диаметром $D = 150$ мм, длиной $H+h = 11,7$ м в режиме максимальной подачи эрлифта при расходе воздуха $Q_a = 0,32$ м³/с и подаче $Q_s = 0,002$ м³/с

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Значение параметра				
Длина участка подъемной трубы	z_i	м	0,000	2,925	5,850	8,775	11,70
Объемное расходное воздухосодержание	β	-	0,993	0,993	0,993	0,994	0,994
Истинное воздухосодержание	φ	-	0,948	0,950	0,952	0,954	0,956
Плотность ядра газожидкостного потока	ρ_c	кг/м ³	4,85	4,69	4,53	4,37	4,21
Скорость гомогенного ядра	w_c	м/с	18,0	18,6	19,2	19,9	20,7
Скорость воды в пристенной пленке	w'_f	м/с	0,482	0,482	0,482	0,482	0,482
Перепад давления, обусловленный: - силой тяжести - трением - ускорением	p_g $p_{тр}$ $p_{уск}$	кПа	0 0 0	3,6 0,078 0,047	7,2 0,156 0,096	10,8 0,234 0,15	14,4 0,312 0,208
Суммарный перепад давления	p_Σ	кПа	0	3,73	7,46	11,2	14,9
Мощность потока: - воды - сжатого воздуха	N' N''	кВт	0,03 0,0	0,03 1,05	0,03 2,14	0,03 3,27	0,03 4,44
Мощность подведенная	$N_{под}$	кВт	0,03	1,08	2,17	3,30	4,47
Мощность для преодоления: - силы тяжести - потерь на трение - потерь на ускорение - потерь на скольжение	N_g $N_{тр}$ $N_{уск}$ $N_{ск}$	кВт	0,0 0,0 0,0 0,03	0,068 0,001 0,001 1,01	0,137 0,003 0,002 2,03	0,205 0,004 0,003 3,09	0,274 0,006 0,004 4,19

Основная часть потерь составляет мощность скольжения фаз, которая монотонно увеличивается по высоте трубы и при $z = H+h = 11,7$ м равняется $N_{ск} = 4,19$ кВт.

Следует отметить, что использовавшаяся методика определения мощности для преодоления потерь на скольжение построена на определенных допущениях, что подробно изложено в [4] на примере снарядной структуры.

Таким образом, разработанная математическая модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой газожидкостной смеси позволяет определять изменения гидродинамических параметров водовоздушного потока по высоте подъемной трубы.

5. Выводы и направление дальнейших исследований. Впервые аналитическим методом установлены закономерности изменения объемного расходного и истинного газосодержаний, плотности водовоздушной смеси, скоростей компонентов потока, давлений и мощностей, затрачиваемых на компенсацию сил тяжести, трения и инерции, а также потерь на скольжение фаз по высоте подъемной трубы эрлифта.

Полученные результаты позволят уточнить энергетически целесообразные режимы эксплуатации эрлифтов и разработать рекомендации по совершенствованию газожидкостных подъемников.

Список литературы: 1. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта. Науковий журнал "Вісник ДонДУЕТ". Серія "Технічні науки". №1(29). - Донецьк: ДонДУЕТ, 2006, с. 20-30. 2. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Энергетические параметры эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – Вип. 12 (113) - С. 17-32. 3. Кононенко А.П. Давления и мощности кольцевого водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СУНУ. – 2007. - №3(109), Частина 1. – С.141-147. 4. Кононенко А.П. Изменение гидродинамических параметров снарядного водовоздушного потока по высоте подъемной трубы эрлифта // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2006. - №12(96). - С. 12-22. 5. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2005. - №12(84). - С. 38-48. 6. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока // Промислова гідравліка і пневматика. - Вінниця. - 2006. - №1 (11). - С. 34-37. 7. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". - Харків: НТУ "ХПИ". – 2006. - №27. - С. 113-121. 8. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н. и др. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с. 9. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н. и др. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с. 10. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків. - 2006. - №5/1 (23). - С. 58-61. 11. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць: "Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва". – Макіївка: ДНАБА. – 2005. – Вип. 2005-7(55). - С. 71-81.

Поступила в редакцію 20.03.2010 г.